

環境対策、エネルギー効率の向上 製造業

3.1.4 紙パルプ産業のエネルギー効率向上

製造部門が消費する二次エネルギーは日本全体の43%（2016年度）で、紙パルプ産業はそのうちの5.9%（全体では約2.5%）を占めています。製紙工場では木材チップをアルカリ溶液で繊維質と非繊維質に分けますが、この時に発生するパルプ廃液（通称は黒液）を濃縮し、ボイラー燃料に利用しています。環境保全と同時にエネルギー効率の向上に寄与する優れた技術です。

日本製紙連合会の資料によると、日本の紙パルプ産業のエネルギー原単位は、1981年から2013年までに約3.5割低減しており、世界最高の水準に達しています。本稿ではこれまでで採用されてきた紙パルプ産業の省エネルギー対策と、エネルギー効率の向上に大きく寄与しているパルプ廃液の燃料利用について概説します。

1. 省エネルギー対策の概要

1990年頃までに採用されてきた最大の省エネルギー対策は、次節に述べる黒液の燃料利用です。化学パルプ製造設備の大型化も、エネルギー消費原単位の改善に寄与しました。製紙設備は化学プラントなので、設備を大型化するとエネルギー効率が向上するのです。なお、木材からパルプを作る製法には、化学パルプ法と機械パルプ法の2種類があります。化学パルプ法は化学薬品を使って木材から繊維を取り出す方法で、クラフトパルプ（KP）が代表的な製品です。ちなみに「クラフト」という言葉は、ドイツ語で「強い」という意味です。機械パルプ法では木材を機械ですり潰し、化学薬品を使わずに繊維を取り出します。現在の日本の製法は化学パルプ法が約9割で、機械パルプ

法が約1割です。古紙利用率の増大もエネルギー消費原単位の改善に寄与しており、2000の時点で60%を超えています。古紙を原料とする製紙は古紙のパルプから直接紙を作るので、木材からパルプを作り、そのパルプから紙を作る製法に比べてエネルギー投入量が少なく済みます。漂白に必要な抄紙機（しょうしき）の密閉フード化も、エネルギー効率の向上に大きく貢献しています。

1990年以降の省エネルギー対策は、古紙利用率の6割以上への拡大、黒液濃縮缶の効率向上、黒液ボイラーの高温高压化による発電量の増大などです。黒液は木材からパルプを作るときに発生する廃液で、蒸発缶で濃縮し、専用の黒液ボイラーで燃焼させて蒸気を発生させています。製紙産業が使用するエネルギーは表1に示すように、再生可能エネルギーの比率が高いのが大きな

表1. 製紙産業の使用エネルギー比率（2013年）

種別	比率	内訳
再生可能エネルギー	42.5%	黒液、廃材 ペーパースラッジ
化石燃料と電力	48.0%	石炭、石油、天然ガス、 電力
廃棄物	9.5%	廃タイヤ、廃プラ

特徴です。エネルギー効率は総合的な数値だけではなく、温室効果ガスを発生させる石油や石炭などの化石燃料と、バイオマスなど再生可能エネルギーを区別して評価するのが望ましいでしょう。

2. 黒液の燃料利用

2.1 クラフトパルプ（KP）の製造工程

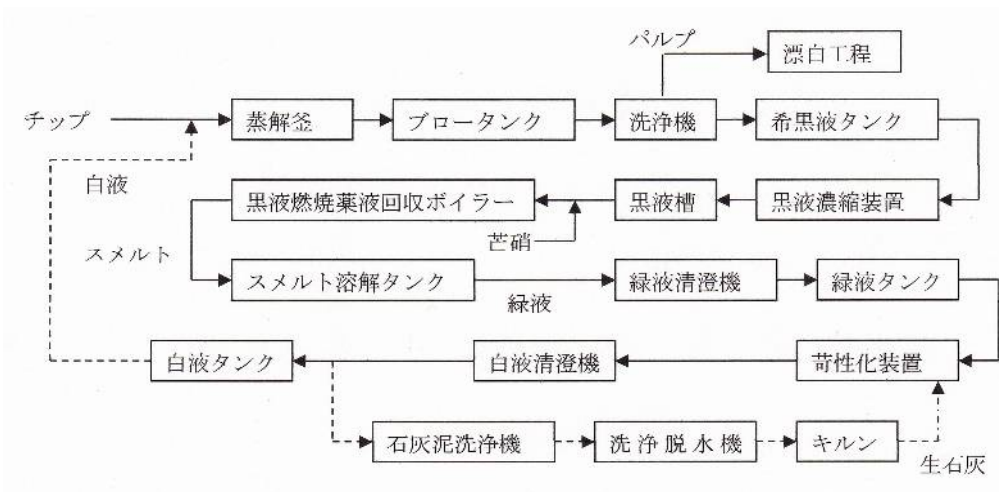


図 1. クラフトパルプ (KP) の製造工程

クラフトパルプ (KP) の製造工程を大別すると、図 1 に示すように上段のパルプ化工程と、中断の蒸解薬液回収工程、および下段の薬液再生工程で構成されています。パルプ化工程では、蒸解釜で原料木材チップをアルカリ溶液（蒸解液、白液ともいう）で蒸解し、繊維質と繊維を結びつけていた成分のリグニンを分離します。均一な品質のパルプを得るにはチップサイズをそろえ、アルカリ溶液をチップ中に均一に浸透させる必要があります。このため釜に入れる前にチップスクリーンを

設置し、チップサイズを長さが 10～30mm、厚さが 3～8mm 程度に調整します。蒸解釜には回分式と連続式がありますが、近年はエネルギー効率に優れた連続式が主流になっています。連続蒸解釜は高さが約 50 メートルもある塔で、上部が蒸解ゾーン、下部が洗浄ゾーンになっています。木材チップとアルカリ溶液は塔頂から送入され、下降しながら 5～6 時間かけてアルカリ溶液の浸透・加熱・蒸解・洗浄が行われます。得られた繊維質のパルプは、下流の漂白工程、脱水工程、乾燥工程を経て、最後に巻取りと裁断が行われます。蒸解廃液（希黒液）には、リグニンなど大量の有機物とアルカリ溶液が残存しており、黒液濃縮工程に送られます。

2.2 黒液濃縮工程

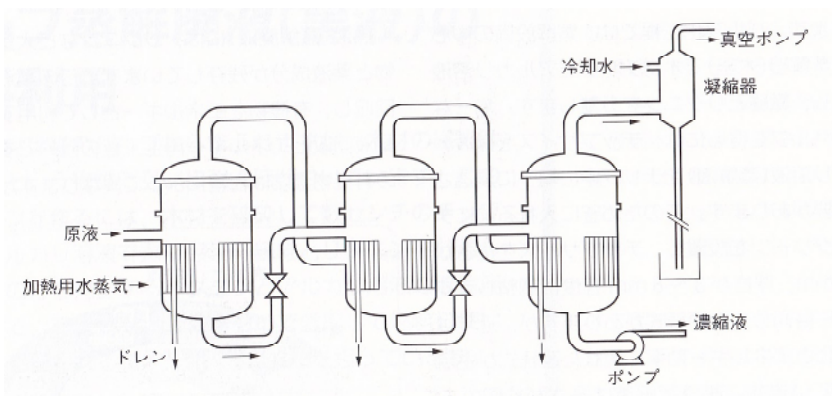


図 2. 多重効用化による黒液濃縮

黒液濃縮工程の目的は黒液の水分を蒸発させ、有機物の濃度を燃料として利用できる水準にまで高めることにあります。黒液に含まれている有機物の濃度は樹種によって異なりますが、通常は 16%～22%です。このため図 2 に示す多重効用缶で、ボイラーで燃焼できる 70%以上の濃度に濃縮します。多重効用缶は溶液の濃縮に広く用いられる

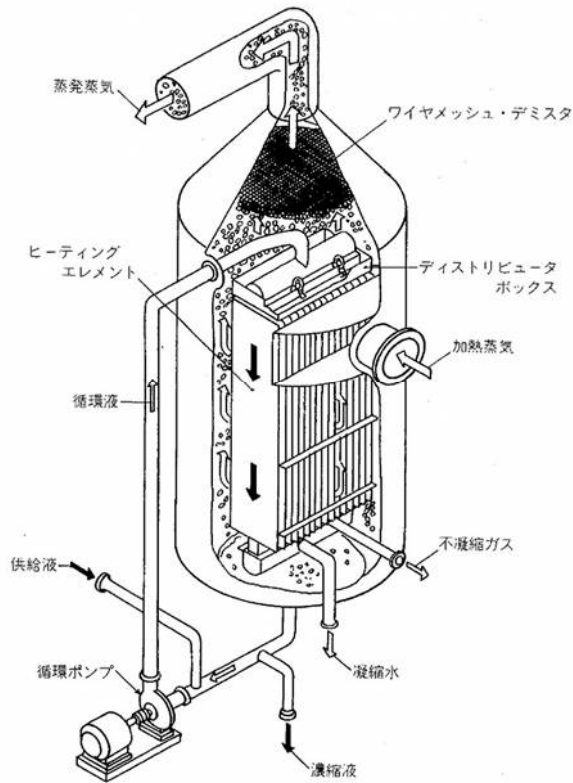


図 3. プレート式液膜降下型エバポレーター
 出展：“紙パルプ技術便覧”
 紙パルプ技術協会, P132, 2002

方法で、図 2 に示すように複数の蒸発缶を直列に配置し、前の蒸発缶で発生した蒸気を圧力の低い次の蒸発缶の熱源に利用します。このため、自己蒸気圧縮式ヒートポンプとも呼ばれます。溶液は濃縮によって沸点が高くなりますが、順次、操作圧力を低くすることで沸点上昇を抑え、熱源との温度差を確保します。このため非常に高いエネルギー効率が得られます。図 2 には 3 缶しか記載しませんが、黒液濃縮には連続する 5 缶から 6 缶が使われます。図 2 の最初の効用缶で分離される蒸気ドレンは、水質に問題がなければボイラー給水に利用できます。一方、最終蒸発缶の蒸気は、減圧状態で凝縮されます。なお、黒液燃焼時に発生する悪臭を防ぐため、通常は濃縮工程の前か後に酸

化装置を設けます。

個々の効用缶はエバポレーターと呼ばれますが、装置としては長管薄膜上昇型、強制循環型、液膜流下型があります。長管薄膜上昇型は長さが 10 メートル以上になる縦型の多管式熱交換器で、黒液は下部から管内に入り、外側の蒸気で加熱され沸騰します。2 相流になった黒液は、上部のドラム部分で衝突板にぶつかり気液が分離します。この形式は伝熱係数の制約から、5 重効用缶までが限界です。強制循環型では、多管式の蒸気加熱器に黒液をポンプで強制循環させ、上部に設置した蒸気ドラムで気液を分離します。濃縮は 65%程度が上限で、循環ポンプの動力が大きいのが難点です。液膜流下型には、加熱方法の違いによって管式とプレート式があります。黒液は縦型エバポレーターの上部に供給され、加熱面に沿って流下しつつ薄膜を形成して、水分が蒸発して濃縮します。図 3 はプレート式のエバポレーターですが、温度差を小さくできるので

効率がよく、50%以上の濃縮液が得られます。このプレート式エバポレーターを複数組合せ、交互に洗浄しながら運転すると 70%以上に濃縮できるので、最近はこの方式が主流になっています。

2.3 黒液燃焼と薬液回収工程 (薬液回収ボイラー)

濃縮された黒液 (濃度:72~75%程度) はボイラーで燃焼し、エネルギーと同時にアルカリ溶液を回収します。黒液には Na_2SO_4 、 Na_2CO_3 、 Na_2S など、ナトリウムや硫黄化合物が大量に含まれています。このためボイラー加熱管の腐食対策に、特別な工夫が採用されています。

られる蒸気の条件として
10MP (100kg/cm²)・500℃
クラスが稼働しています。

3. 黒液燃料利用の意義

黒液燃料利用の意義は、
本来は廃棄物になりかねない
廃液から熱量と薬液を回収し、
省エネルギーと同時に環境保
全にも貢献している点です。
もし黒液が燃料として利用で
きなれば、有機物 (BOD) の濃
度が 35,000～40,000mg/リ
ットルの高濃度排水処理が必
要になり、膨大な費用がかか
るでしょう。なお、世界的に
見ると全パルプの 10%程度
が藁や竹など非木材系の原料
から作られています。し

かし、非木材系パルプは黒液の粘度が高く、蒸発缶の内壁に付着するので、燃料に使用できる水準の高濃度濃縮が困難です。一方、生物処理には 100 倍ぐらいに希釈する必要があるため、排水処理が困難です。このため、木材資源の乏しい地域の製紙工場が水質汚染の原因になっています。今後は非木材パルプの黒液燃料化も期待したいものです。

(おわり)

参考：日本製紙連合会資料 (HP)

パルプ蒸解廃液 (黒液) の燃料利用：
(図解：新エネルギーのすべて (丸善出版))

紙パルプ産業のエネルギー事情：

日本製紙連合会 技術環境部 (2018 年 12 月)
2018 年度 (2017 年度実績) 版

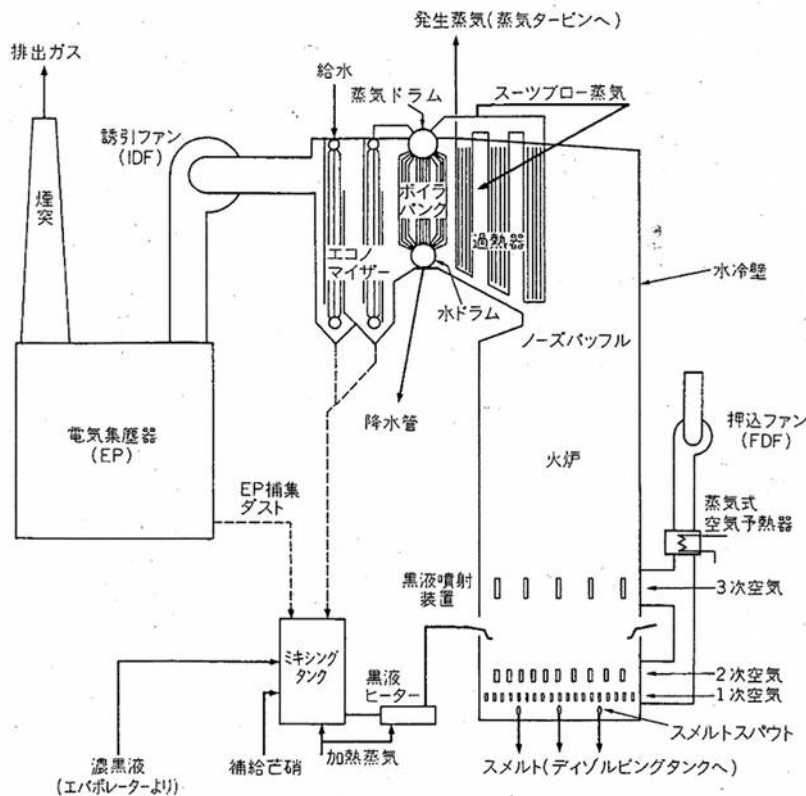


図 4. 黒液燃焼薬液回収ボイラー

出典：“紙パルプ製造技術シリーズ・クラフトパルプ” P189

図 4 は一般的な黒液燃焼薬液回収ボイラーです。濃縮黒液はミキシングタンクに送られ、集塵機でダストとして捕集される芒硝と混合してボイラー内に噴射し燃焼させます。濃縮黒液は高位発熱量が約 12,000kJ/kg (約 2,900kcal/kg) で、低質石炭に近い発熱量です。ボイラーの炉底には不燃物のチャーが堆積し、同時に約 800℃の溶融薬液 (スメルト) が得られます。スメルト (緑液ともいう) はボイラー前面の樋でスメルトタンクに送られ、さらに下流の複数の装置を経て苛性化装置に送られます。苛性化装置で生石灰を加えると、澄んだアルカリ溶液 (白液) に戻るので、パルプ化工程に送られ循環利用されます。黒液燃焼薬液回収ボイラーは高効率化が進んでおり、発電タービンに送